

Exploration de stratégies d'amélioration de la conduite de l'irrigation de la luzerne (*Medicago sativa* L.), du bersim (*Trifolium Alexandrinum* L.) et du maïs ensilage (*Zea mays* L.) au Tadla

B. BOUAZZAMA¹, A. BOUAZIZ², D. XANTHOULIS³, M. JBILOU¹

(Reçu le 13/01/2017; Accepté le 08/03/2017)

Résumé

Le modèle CropSyst a été utilisé pour explorer des scénarios d'irrigation des principales cultures fourragères au Tadla au Maroc. La calibration et la validation du modèle CropSyst ont été réalisées précédemment pour la luzerne, le maïs d'ensilage et le bersim. Des simulations de plusieurs scénarios impliquant une combinaison des moments d'irrigation et des quantités d'eau appliquées ont été réalisées sur 40 ans avec des données climatiques journalières. Pour la luzerne, les résultats indiquent que l'application de 1600 mm d'eau maximise l'efficacité d'utilisation de l'eau ($1,21 \text{ kg/m}^3$) et permet d'atteindre un rendement de 23,1 t/ha. Dans le cas du maïs, l'application de 648 mm à travers 2 irrigations en phase initiale, 2 irrigations en phase linéaire et deux en phase finale permet d'obtenir un rendement élevé en biomasse et une meilleure productivité de l'eau. Sur le bersim, les résultats de simulation confirment que l'adoption du scénario qui fournit 625 mm permet d'obtenir 14,1 t/ha de matière sèche qui représente 94% du potentiel de rendement. Finalement, le couplage des résultats d'expérimentation de quatre ans (2008 - 2012) avec les simulations de scénarios par CropSyst s'est avéré très pratique pour améliorer l'irrigation des cultures fourragères au Tadla.

Mots-clés: Luzerne, maïs ensilage, modèle CropSyst, scénario d'irrigation, Tadla, Maroc

Exploration of strategies to improve irrigation management of alfalfa (*Medicago sativa* L.), berseem (*Trifolium Alexandrinum* L.) and silage maize (*Zea mays* L.) in Tadla – Morocco

Abstract

The CropSyst model, an operative crop model, is used to explore irrigation scenarios for the main forage crops in Tadla irrigated district in Morocco. The calibration and validation of CropSyst model was previously undertaken for alfalfa, silage maize and berseem. The model was run for a 40 year simulation with daily climatic data; using several scenarios involving a combination of irrigation dates and water amounts. For alfalfa, the results indicate that applying 1600 mm of irrigation water maximized irrigation water use efficiency (1.21 kg/m^3) and achieved a yield of 23.1 t/ha (95% of the yield potential). In the case of maize, application of 648 mm through two irrigations in initial phase, two irrigations in linear and two in final phases allowed to achieve high biomass yield and better water productivity. On berseem, the simulation results confirmed that the adoption of the scenario that provides 625 mm allowed obtaining 14.1 t/ha of dry matter which represents 94% of the yield potential. Finally, the coupling of the results of four years experiments (2008 - 2012) with the simulations of scenarios by CropSyst has shown to be highly effective in order to improve forage crops irrigation in the Tadla.

Keywords: Alfalfa, berseem, silage maize, CropSyst model, irrigation scenarios, Tadla, Morocco.

INTRODUCTION

Dans la zone méditerranéenne où les ressources en eau sont limitées, il est fondamental d'optimiser la gestion de l'irrigation pour maximiser l'efficacité économique de l'eau et, en même temps, réduire les pertes. La vérification du temps optimal et du volume d'eau d'irrigation nécessite des expérimentations en station souvent longues et coûteuses. En outre, il est impossible de tester toutes les situations combinant les paramètres d'irrigation représentés par le moment, la fréquence et la dose d'irrigation. Il est également nécessaire de reproduire les essais dans le temps afin de tenir compte des changements climatiques. La planification de l'irrigation peut changer considérablement en fonction de la date de semis, de la fertilisation azotée et du système d'irrigation utilisé.

Le recours aux outils dynamiques pour planifier l'irrigation, en tenant compte des considérations susmentionnées, est faisable moyennant des modèles de simulation

mathématique. Une fois calibrés et validés sur la base des données expérimentales, les modèles peuvent aider à choisir des stratégies d'irrigation avant ou pendant le cycle végétal, en tenant compte des interactions multiples entre sol, climat, génotype et les pratiques culturales (Rizzo et al., 1992).

Dans des études antérieures, le modèle CropSyst a été calibré et validé sous les conditions Tadla pour les principales cultures fourragères (Bouazzama, 2012, 2014 et 2015). Les résultats ont prouvé que le modèle est capable de simuler correctement la croissance et le rendement en biomasse de la luzerne, le bersim et le maïs ensilage sous des régimes hydriques contrastés.

Le but de cette étude est de comparer plusieurs stratégies d'irrigation des trois principales cultures fourragères (luzerne, bersim et maïs) dans l'objectif de réaliser les meilleures rendements en biomasse et de maximiser l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation.

¹ Institut National de la Recherche Agronomique, CRRA Tadla, Beni Mellal, Maroc

² Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

³ Unité d'Hydraulique et d'Hydrologie, University of Liège Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation du modèle CropSyst

CropSyst (Stockle et al., 1994, 2003 ; Stockle and Nelson, 2000) est un modèle de culture pluri-culturel et pluri-annuel qui fonctionne au pas de temps journalier et à l'échelle de la parcelle. Il s'agit d'un modèle fonctionnel muni d'une interface utilisateur adaptée. Le modèle évolue en permanence grâce aux avis que les utilisateurs ont pu fournir lors de son utilisation dans de nombreuses conditions environnementales et édaphiques différentes (Stöckle et al., 2003).

Le modèle CropSyst utilise la même approche pour simuler la croissance et le développement de toutes les cultures herbacées. Pour atteindre cet objectif, des simplifications ont été introduites pour décrire certains processus. Parmi ces simplifications, on cite le couvert monocouche; la surface foliaire spécifique constante (SLA) et l'absence de répartition quotidienne des assimilés. Cette simplification rend CropSyst plus facile à calibrer avec un nombre réduit de paramètres culturels par rapport à d'autres modèles tel que CERES (Ritchie et al., 1985, Jones et Kiniry, 1986) qui est très détaillé dans la description de la physiologie des cultures. Ces aspects et la possibilité de simuler des rotations font de CropSyst un outil utile pour les simulations à grande échelle (Confalonieri et Bechini, 2004).

Le développement des cultures est simulé sur la base du temps thermique accumulé nécessaire pour atteindre chaque stade végétatif. Le modèle tient compte de quatre facteurs limitant potentiellement la croissance des cultures: l'interception du rayonnement, l'absorption hydrique et azotée, et la température. La croissance quotidienne des cultures est basée sur deux approches différentes: (i) la croissance de la biomasse dépendant du rayonnement, basée sur le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la culture, et (ii) la croissance de la biomasse dépendante de la transpiration, en s'appuyant sur l'estimation de la transpiration potentielle. Selon la première approche, CropSyst simule la production quotidienne de biomasse aérienne en utilisant l'équation suivante (Monteith, 1977):

$$AGB_{IPAR} = RUE \times IPAR \times T_{lim} \quad (1)$$

Où AGB_{IPAR} est la croissance journalière de la biomasse aérienne dépendant de la radiation photosynthétique active interceptée; RUE est le facteur de conversion de la radiation en biomasse aérienne ou l'efficacité d'utilisation du rayonnement; T_{lim} est le facteur limitant lié à la température; et IPAR est le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté. Selon la deuxième approche, CropSyst simule la production quotidienne de biomasse aérienne en utilisant l'équation suivante (Tanner et Sinclair, 1983):

$$AGB_T = T_{act} \times BTR/VPD \quad (2)$$

Avec AGB_T est la croissance dépendante de la transpiration; T_{act} est la transpiration réelle; BTR est le coefficient de transpiration-biomasse aérienne; et VPD est le déficit moyen journalier de pression de vapeur, utilisé pour normaliser BTR. Par ailleurs, dans CropSyst, le taux de production de la biomasse est simulé par capture de rayonnement ou d'eau,

selon le facteur le plus limitant parmi eux. La transpiration est supposée égale à l'absorption de l'eau par la culture, qui est fonction du sol et du potentiel hydrique foliaire, et de la conductance des racines.

Dans CropSyst, le bilan hydrique inclut les précipitations, l'irrigation, le ruissellement, l'infiltration d'eau et la redistribution de l'eau dans le profil du sol, la transpiration des cultures et l'évaporation à partir du sol. La redistribution de l'eau dans le sol peut être simulée par une simple approche en cascade ou une solution numérique de l'équation de Richard pour déterminer les flux hydriques dans le sol. La solution numérique correspond à un schéma de différences finies, similaire à celui introduit par Campbell (1985) et modifié par Ross et Bristow (1990) pour les sols stratifiés. L'évapotranspiration de référence est estimée soit par l'approche de Penman Monteith (Allen et al., 1998), soit par l'équation de Priestley-Taylor (Priestley et Taylor, 1972) en fonction de la disponibilité des données météorologiques.

La croissance racinaire est décrite dans CropSyst en termes de profondeur et de densité des racines. L'absorption d'eau par les racines et la transpiration réelle de la culture sont considérées égales, et donc le stockage de l'eau dans le végétal est supposé négligeable. Pour l'estimation de l'absorption racinaire de l'eau, le profil du sol est divisé en plusieurs couches. L'absorption de l'eau de chaque couche est calculée à partir de la différence de potentiel hydrique entre le sol et le xylème végétal multiplié par la conductance de la plante (déterminé surtout par la conductance racinaire).

La conductance du sol est supposée élevée par rapport à la conductance des racines, de sorte que l'absorption hydrique n'est pas limitée par le mouvement de l'eau vers les racines. L'absorption d'eau en $((kg/m^2)/jour)$, à partir de chaque couche du sol i est donnée par:

$$WU_i = K \cdot C_i/1.5 \cdot (\Psi_{si} - \Psi_l) \quad (3)$$

Où Ψ_{si} (J/kg ou m^2/s^2) est le potentiel hydrique de la couche du sol i . Ψ_l (J/kg ou m^2/s^2) est le potentiel hydrique foliaire. C_i est la conductance racinaire de la couche i . K (86 400) est le nombre de secondes par jour. L'absorption hydrique totale WU est la somme de l'absorption de l'eau de toutes les couches formant le profil du sol.

La limitation de la croissance due à l'eau est calculée à l'aide de paramètres qui affectent directement l'accumulation de biomasse, y compris le rapport entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, les potentiels hydriques foliaires qui induisent la fermeture et le flétrissement des stomates et les sensibilités phénologiques au stress hydrique (Stockle et al., 2003). La réduction du rendement liée au stress hydrique est calculée en utilisant des paramètres qui affectent le rendement par la limitation de la translocation des assimilés, telles que la sensibilité au stress hydrique à la floraison et à la maturité.

Le rendement final est calculé en multipliant la biomasse totale au moment de la récolte par l'indice de récolte HI (Stockle et Nelson, 2000). Dans CropSyst, on détermine HI à partir d'un HI_0 non stressé, modifié en fonction de l'intensité du stress hydrique et azoté (eau et N) et de la

sensibilité de la culture au stress pendant la floraison et le remplissage du grain.

Dans le cas de cultures fourragères exploitées en coupes telles que le bersim et la luzerne, le rendement en biomasse peut être déterminé en fonction d'un pourcentage de la biomasse sèche accumulée le jour de la coupe ou en fonction d'une quantité de biomasse à retirer de la biomasse le jour de la coupe. Pour assurer la repousse après la coupe, le modèle définit pour chaque cycle un indice de surface foliaire minimum (GAI).

Zone d'étude

Les données relatives au sol et aux cultures, utilisées pour les simulations, ont été collectées au domaine expérimental de Tadla (X = 32.3; Y = 6.31'; Z = 450 m) de l'Institut National de la recherche agronomique (INRA) (Maroc). Le sol est classé comme argileux limoneux. Quelques propriétés physiques et chimiques du sol de la parcelle sont récapitulées dans le tableau 1. Le climat de la zone d'étude est semi-aride avec une forte irrégularité de la pluie. La pluviométrie annuelle est d'environ 307 mm, la température moyenne est de 18 °C avec un maximum au mois d'août qui peut dépasser 45° et le minimum en janvier qui avoisine 0°C. Les principales caractéristiques du climat sont reportées par la figure 1.

Les simulations

Les simulations sont réalisées sur la période 1^{er} janvier 1971 - 31 décembre 2011, moyennant les données climatiques collectées au niveau de la station climatique d'Ouled Gnaou de l'ORMVA de Tadla. Les valeurs journalières de la température (maximum et minimum), l'humidité relative, la radiation solaire, la vitesse du vent et la pluviométrie sont utilisés comme inputs du modèle. L'équation de Penman Montheith a été adoptée pour le calcul de l'évapotranspiration. La version de CropSyst utilisée dans le présent travail est la version 4.15.16.

Avant l'élaboration des stratégies d'irrigation, des enquêtes et mesures sur terrain ont été réalisées sur un échantillon représentatif des exploitations pratiquant les trois fourrages au niveau du périmètre irrigué de Tadla (Bouazzama, 2013). Les enquêtes ont porté entre autres sur les dates de semis et de récolte pour le maïs et l'emplacement des cycles et les dates de coupes pour le bersim et la luzerne, les doses d'irrigation en fonction des types de sols et les périodes de l'apport, les dimensions des dispositifs d'irrigation, les débits manipulés et les durées d'irrigation. Les résultats d'enquêtes ont permis de concevoir des scénarios d'irrigations. Le but étant de diversifier les scénarios pour qu'ils soient, d'une part, représentatifs

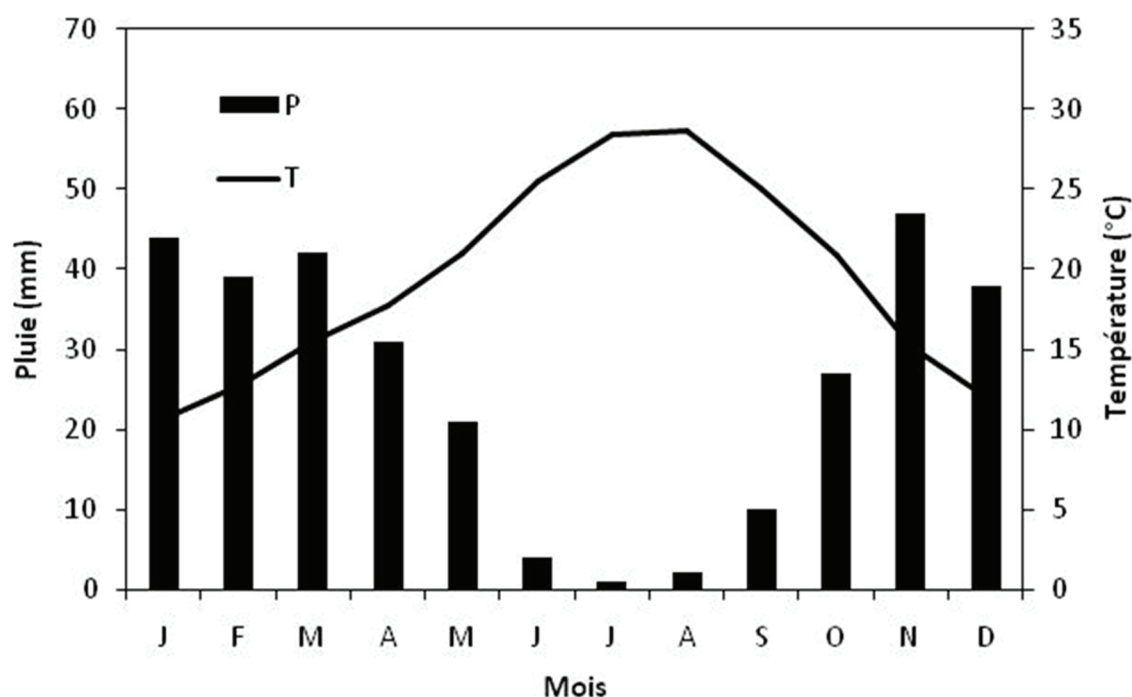


Figure 1: Climatogramme de la plaine du Tadla réalisé à partir des moyennes climatologiques 1980-2011

Tableau 1: Quelques caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles d'expérimentation

Horizon (cm)	Granulométrie* (%)					Hcc %	HpF %	da	Calc. Total %	MO %	P ₂ O ₅ Assim. (ppm)	K ₂ O Echa. (ppm)	pH	CEps
	A	LF	LG	SF	SG									
0-30	28,1	4,2	48,6	11,8	7,3	33,5	16,4	1,32	14,8	1,91	20,01	1120	7,92	1,04
30-60	43,1	15,6	3,1	12,2	26,2	39,1	20,4	1,44	5,9	1,08	5,14	350	8,09	0,43
60-120	46,7	17,2	20,1	12,3	3,8	41,0	25,1	1,52	12,3	0,76	6,78	224	8,23	0,49

* : A (< 2µm), LF (2µm à 20 µm), LG (20 µm à 50 µm), SF (50 µm à 0,2 mm) et SG (0,2 mm à 2 mm)

des situations d'irrigation si nombreuses dans la région et, d'autre part, faire un choix raisonné de stratégies beaucoup mieux adaptées.

Scénarios testés pour la luzerne

Selon les résultats d'enquêtes, l'exploitation de la luzerne au Tadla se fait à travers 9 cycles environ par an selon le calendrier moyen donné au tableau 2. Les cycles de l'année de semis, année d'établissement de la luzerne, ne sont pas considérés dans la comparaison des scénarios. Selon le service de la production végétale de l'ORMVA Tadla, organisme étatique de développement qui s'occupe de la gestion de l'irrigation au niveau de la zone de Tadla, les décalages des dates de coupe entre agriculteurs sont liés au niveau de l'entretien des luzernières et la conduite de l'irrigation.

Le matériel végétal adopté est la variété *Super Siriver* qui est la plus pratiquée au Tadla. Les scénarios testés portent sur l'emplacement et le nombre d'irrigations appliquées selon les doses mesurées chez les agriculteurs (Tableau 4). Selon les résultats des essais d'irrigation à la parcelle, la luzerne est plus productive et valorise mieux l'eau au printemps, suivi de l'été et l'automne (Bouazzama, 2015 et Saeed et El Nadi, 1997). Quelques irrigations en hiver peuvent être apportées, si la pluie est absente, pour limiter l'effet du froid et apporter un complément de fertilisation phosphatée. Tenant compte des ambitions du service de distribution de l'eau au périmètre et dans un objectif de faciliter la programmation des irrigations, l'élaboration des scénarios a été effectuée selon les saisons: le printemps (cycle 2, 3 et 4), l'été (cycle 5, 6 et 7), l'automne (cycle 8) et l'hiver (cycle 9 et 1). Le tableau 3 récapitule les scénarios testés.

Dans chaque cycle et selon le nombre d'apports en eau appliqué, l'emplacement des irrigations est comme suit:

- 1 irrigation: après la coupe
- 2 irrigations: la 1^{ère} après la coupe et la 2^{ème} au 10^{ème} jour après la coupe
- 3 irrigations: la 1^{ère} après la coupe, la 2^{ème} au 7^{ème} jour et la 3^{ème} au 15^{ème} jour
- 4 irrigations: la 1^{ère} après la coupe, la 2^{ème} au 7^{ème} jour, la 3^{ème} au 15^{ème} jour et la 4^{ème} au 22^{ème} jour après la coupe

Tableau 2: Calendrier des cycles de la luzerne et leurs numérotations

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Emplacement des cycles	XXXX	XX**	****	XXXX	X***	*XXX	X***	*XXX	X***	***X	XXXX	XXX*
N° cycle	1		2	3	4	5	6	7	8	9		

Tableau 4: Dose d'irrigation moyenne (mm) appliquée par irrigation pour la luzerne en fonction des périodes

Mois	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.
Dose (mm)	75±9,3	82±11,4	105±11,3	112±13,1	123±14,4	130±15,2	108±12,6	110±13,2	84±5,3

Tableau 5: Cycle de la culture du maïs ensilage au Tadla en fonction des dates de semis

Mois	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
Période de la culture			****	****	****			

Tableau 3: Scénarios virtuels testés pour la luzerne en fonction des saisons

N° scénario	Printemps	Été	Automne	Hivers
L1	3	3	1	0
L2	3	3	1	2
L3	6	9	1	1
L4	6	12	2	1
L5	9	6	1	1
L6	12	3	1	0
L7	6	3	1	1
L8	6	6	1	1

Cet emplacement des irrigations à l'intérieure d'un cycle vient du fait que, selon les résultats d'essais à la parcelle (Bouazzama, 2015), la luzerne est sensible au stress hydrique immédiatement après une coupe d'une part et d'autre part, du fait que la phase de croissance linéaire se situe dans les 20 premiers jours après une coupe (Saeed et El Nadi, 1997).

Les luzernières sont arrosées moyennant l'irrigation gravitaire. Les doses moyennes par irrigation (Tableau 4) ont été déterminées en se basant sur des doses réelles mesurées moyennant des déversoirs à crêtes larges (type RBC) chez un échantillon de parcelles réparties sur tout le périmètre. Les irrigations de l'été et d'automne se distinguent par des doses élevées suite à l'apparition des fissures au niveau des sols et la forte demande climatique.

Scénarios testés pour le maïs ensilage

Conformément aux pratiques au niveau de la zone, les deux irrigations nécessaires après le semis (une avec le semis et une autre au 5^{ème} jour après) ont été respectées pour tous les scénarios testés. Les semis du maïs au Tadla peuvent se réaliser selon trois dates : au début du mois de mars, fin avril/début mai et mi juillet. Le semis du mois de mai a été considéré vu sa pratique sur environ 65% des exploitations enquêtées. Le tableau 5 illustre l'emplacement de la période de pratique du maïs, variété *Cecilia*, au Tadla pour le semis du début de mai.

Les phases de croissance du maïs ensilage déjà caractéri-

sées (Bouazzama, 2012) sont désignées par les lettres A, B et C pour la phase initiale, linéaire et finale respectivement. Selon les résultats d'expérimentation, la valorisation de l'eau durant la phase linéaire est la plus importante. Dans le modèle, les trois phases seront caractérisées par les temps thermiques de début et de la fin (phase initiale: semis - 400 °CJ, phase linéaire: 400-1253 °CJ et finale: 1253-1850 °CJ).

Tableau 6: Scénarios virtuels d'irrigation simulés pour le maïs ensilage

N° scénario	Nombre d'irrigation	Phase d'application
M1	3	ABC
M2	3	1 en A et 2 en B
M3	3	2 en B et 1 en C
M4	3	1 en B et 2 en C
M5	3	B
M6	4	1 en A, 2 en B et 1 en C
M7	4	1 en A et 3 en B
M8	4	1 en A et 1 en B et 2 en C
M9	4	3 en B et 1 en c
M10	4	2 en B et 2 en C
M11	5	1 en A, 3 en B et 1 en C
M12	5	1 en A, 2 en B et 2 en C
M13	5	3 en B et 2 en C
M14	6	3 en B et 3 en C
M15	6	1 en A, 3 en B et 2 en C
M16	6	1 en A, 2 en B et 3 en C
M17	6	1 en A, 4 en B et 1 en C
M18	7	1 en A, 4 en B et 2 en C
M19	8	1 en A, 5 en B et 2 en C
M20	9	1 en A, 5 en B et 3 en C
M21	8	1 en A, 4 en B et 3 en C

Les scénarios testés impliquent l'emplacement et le nombre d'irrigation durant les trois phases de croissance. Les doses d'irrigation moyennes mesurées au niveau des fermes visitées sont données dans le tableau 7.

Scénarios testés pour le bersim

Les semis du bersim sont réalisés dès la fin de la 3^{ème} semaine du mois d'août et se poursuivent jusqu'au début du mois d'octobre. Les semis précoces du bersim présentent l'avantage de réaliser la première coupe du fourrage au début de mois de novembre où la croissance de la luzerne commence à diminuer. Les dates de début et fin des cycles (Tableau 8) varient au sein des exploitations enquêtées en fonction des rythmes de coupe. Des décalages de 7 à 10 jours des dates de coupes ont été notés surtout sur la période décembre-février. Ces décalages sont attribués surtout à l'accès au terrain après une pluie. La date de semis considérée, est celle de septembre qui est pratiquée, selon les enquêtes, par plus de 50% des exploitations visitées. Les calendriers moyens des cycles du bersim sont récapitulés dans le tableau 8. Sachant que la variété retenue pour la conduite des différents essais est la variété 6454.

Les cycles d'hiver coïncident avec la période pluvieuse qui connaît des arrêts d'irrigation. Le nombre d'irrigation alloué par saison sont uniformément (en fonction du nombre) réparties sur les cycles concernés avec une répartition au sein de chaque cycle selon la règle:

- 1 irrigation: juste après la coupe
- 2 irrigations: la 1^{ère} après la coupe et la 2^{ème} au 10^{ème} jour après la coupe
- 3 irrigations: la 1^{ère} après la coupe, la 2^{ème} au 7^{ème} jour et la 3^{ème} au 15^{ème} jour
- 4 irrigations: la 1^{ère} après la coupe, la 2^{ème} au 7^{ème} jour, la 3^{ème} au 15^{ème} jour et la 4^{ème} au 22^{ème} jour après la coupe

Pour l'élaboration des scénarios, nous avons considéré, en concertation avec l'ORMVAT, trois saisons : l'automne (cycle 1), l'hiver (cycle 2 et 3) et le printemps (cycle 4 et 5). La pratique courante au Tadla consiste à apporter deux irrigations après le semis, vu la demande climatique qui caractérise la région au mois de septembre. Une première irrigation au semis pour favoriser la germination et une deuxième au 4^{ème} ou 5^{ème} jour pour homogénéiser la levée.

Tableau 9: Scénarios virtuels d'irrigation simulés pour le bersim

N° scénario	Automne	Hiver	Printemps
B1	1	2	2
B2	2	0	4
B3	2	0	2
B4	2	0	6
B5	3	2	4
B6	3	0	4
B7	2	3	5
B8	3	0	3
B9	1	0	2
B10	3	0	0
B11	0	3	0
B12	0	0	3
B13	3	0	6
B14	3	2	6

En termes de dose d'irrigation, les mesures effectuées au niveau des exploitations visitées ont permis d'établir le tableau 10.

Analyses et choix des scénarios

L'ensemble des scénarios a été analysé séparément selon deux principaux critères:

- 1/ Rendement en biomasse (t/ha⁻¹);
- 2/ Efficience d'utilisation de l'Eau d'Irrigation (EUEI, tonnage matière sèche par m³ eau irrigation):

$$\text{EUEI (kg/m}^3\text{)} = [\text{RdtMS (irrigué)} - \text{Rdt (pluvial)}] / \text{apport eau irrigation} \quad (4)$$

Avec RdtMS est le rendement en matière sèche.

Les meilleurs scénarios ont été choisis sur la base des deux critères. L'importance des pertes en eau par drainage a été également considérée. Les meilleurs scénarios peuvent être proposés comme alternatives pour améliorer la valorisation de l'eau d'irrigation.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Luzerne

Les résultats montrent que les pertes en eau par drainage sont d'autant plus importantes quand les doses d'irrigation sont élevées (Tableau 11). Les pertes par percolation, au printemps, sont également liées aux pluies reçues en fin d'hiver. Au printemps, le rapport drainage/irrigation varie entre 0,29 enregistré sous le scénario 1 avec trois irrigations et 0,68 sous le scénario 6 avec une application de 12 irrigations. En été, le même rapport oscille entre 0,07 sous les scénarios appliquant uniquement trois irrigations (scénario 1 et 2) à 0,63 sous le scénario 4 où ont été apportées 12 irrigations pendant cette saison. Les pertes en eau par drainage, relativement faibles en été, peuvent être attribuées à la forte demande climatique surtout à travers l'évaporation. Sachant que les pertes par fissuration, qui sont plus importantes en été, ne sont pas simulées par le modèle. En considérant les volumes d'eau annuels appliqués, une relation linéaire significative ($R^2 = 0,98$) a été établie entre les pertes par drainage et les apports en eau par irrigation.

L'analyse fréquentielle a montré que la distribution des rendements paraît normale et leur variabilité interannuelle est insignifiante au seuil 5%. Les rendements simulés en biomasse des différents scénarios en relation avec les volumes d'eau d'irrigation sont en concordance avec ceux obtenus aussi bien par expérimentation (Bouazzama, 2015).

Il faut noter que les besoins en eau de la luzerne générés par le modèle sur 40 années en simulant le scénario L4 non stressant (indice de stress hydrique nul sur toute l'année) sont estimés à 1395 mm (CV de 5,2%). Cette valeur est légèrement supérieure aux valeurs calculées sur la base des coefficients culturels K_c de la FAO (Allen et al., 1998), ajustés aux conditions climatiques de Tadla, et l' ET_0 donnée par la formule de Penman Monteith FAO. Les valeurs trouvées sont de 1388 et 1364 mm pour les deux campagnes 2010 et 2011 respectivement.

Sur le tableau 11, on observe que les rendements augmentent avec la quantité d'eau apportée. Bien que le maximum (24,5 t/ha) ait été obtenu avec une dose d'irrigation de

2523 mm, environ 95% de ce potentiel a été réalisé avec une dose de 1600 mm. Ceci s'explique par un taux de satisfaction hydrique ($TSH = ETR/ETM$) et par une efficacité de la transpiration (ET) de la culture liée à l'ETR ($ET = TR/TM$; rapport entre la transpiration réelle TR et la transpiration maximale TM) qui sont tous les deux plus élevées (tab. 11) sous le scénario L4 (0,97- 1,00) et le scénario L8 (0,85-0,96).

En analysant les deux grandeurs TSH et ET par saison, six irrigations au printemps permettent d'avoir en moyenne des taux de satisfaction hydrique et des efficacités de transpiration dépassant 0,90, alors que trois irrigations assurent déjà plus de 0,70. En été, trois irrigations uniformément réparties sur les trois cycles n'assurent que 0,43 et 0,55 pour TSH et ET respectivement. La contribution des cycles d'été au rendement total, sous ces conditions est en moyenne de 30%. En appliquant six irrigations en été, on atteint 0,76 et 0,88 pour TSH et ET respectivement, ce qui permet d'atteindre une contribution au rendement de l'ordre de 35%. Dans tous les scénarios testés, la contribution des cycles de printemps au rendement total est toujours supérieure par rapport à celle d'été.

L'efficacité de l'eau d'irrigation ($kg.m^{-3}$) a été calculée pour les différents scénarios et donnée au tableau 11. La meilleure EEI est de 1,21 $kg.m^{-3}$ et obtenue par le scénario L8 avec une dose d'irrigation d'environ 1600 mm. Ce scénario prévoit l'application de 14 irrigations réparties en 6, 6, 1 et 1 arrosage durant le printemps, l'été, l'automne et le début d'hiver respectivement. Au-delà de cette dose de 1600 mm, l'EEI subit une diminution. Bien que le scénario L6 apporte une dose similaire au scénario 8, la valeur de l'EEI qu'il permet d'atteindre est de 1,02 en raison des valeurs faibles de TSH et ET durant l'été où uniquement trois irrigations ont été appliquées. Ceci confirme bien l'effet des saisons sur la valorisation de l'eau chez la luzerne.

La représentation graphique des rendements en fonction de l'EEI permet de choisir le scénario qui répond au double objectif de maximiser l'EEI, et d'atteindre le meilleur rendement en biomasse. La figure 2 montre que les trois scénarios 5, 6 et 8 permettent d'atteindre des valeurs de rendement et l'EEI, qui dépassent les valeurs moyennes des différents scénarios. Cependant, on note une supériorité en faveur du scénario 8, qui se traduit par un rendement de 23,2 t/ha et la meilleure efficacité de l'eau d'irrigation de 1,21 kg/m^3 . Ce scénario engendre des faibles pertes par drainage en comparaison aux deux autres. En cas de restriction hydrique, le choix du scénario 7, qui applique une dose de

Tableau 7: Dose moyenne d'irrigation (mm) par période mesurées sur le maïs ensilage

Mois	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
Dose (mm)	67 ± 9,8	66 ± 8,4	85 ± 12,3	114 ± 10,1	123 ± 9,2	130 ± 11,3	128 ± 9,4	123 ± 10,1

Tableau 8: Calendrier moyen des cycles du bersim en fonction des dates de semi

Mois	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai
Emplacement des cycles		**	****	****	xxxx	xxxx	****	xxxx	****	
N° cycle			1		2		3		4	

1200 mm à travers 11 irrigations, est à adopter. Ce scénario permet de réaliser 74% du rendement potentiel et une EEI proche du maximum associée à des pertes par drainage beaucoup moins importantes en comparaison au scénario 8.

Maïs ensilage

Les rendements du maïs, comme simulés par le modèle sur 40 ans, sont généralement dans les ordres de grandeur des valeurs obtenues à travers des essais au niveau de la station (Tableau 12).

Concernant les moments d'irrigation, la phase linéaire (B) qui se produit pour la variété étudiée "*Cecilia*" entre les temps thermiques 400 et 1253 °C.J, reste de loin la plus sensible aux apports hydriques. Les résultats montrent que l'application de deux irrigations, en plus de celles au semis, permet à cette phase, de réaliser le rendement final en biomasse le plus élevé (8,1 t/ha) en comparaison avec la phase finale et initiale (6,3 et 3,7 t/ha respectivement).

L'application d'irrigations supplémentaires à la phase initiale (A), en plus des deux arrosages du semis, ne produit aucune augmentation du rendement. Cette phase est moins sensible à l'apport hydrique, comme le montre à titre d'illustration la comparaison des scénarios n° 6 (3 irrigations) et n° 9 (4 irrigations) avec des rendements en biomasse de 13,2 et 13,3 t/ha respectivement.

Les simulations du modèle montrent qu'en considérant les scénarios où deux irrigations sont appliquées à la phase B, les apports d'eau à la 3^{ème} phase permettent d'augmenter le rendement de 63, 92 et 93% pour l'application supplémentaire d'une, deux et trois irrigations respectivement. Le gain du rendement est faible, en comparant le scénario n° 15 (3 irrigations à la phase C) et le scénario n° 12 (2 arrosages).

En prenant les scénarios à trois irrigations à la 2^{ème} phase, le gain du rendement est alors de 35, 57 et 58%, si on ajoute respectivement une, deux et trois irrigations à la phase finale (C). Le gain à partir de la 2^{ème} irrigation est faible. L'application de 4 ou 5 irrigations, en 2^{ème} phase, associée à une ou deux irrigations à la phase finale, ne produit plus de gain significatif au niveau des rendements. A partir des simulations du modèle, les rendements atteignent leurs maximums au niveau des scénarios appliquant 700 mm et plus. Ainsi, le scénario n°13 assure un rendement de 16,16 t/ha avec un apport de 758 mm, tandis que le 19^{ème} scénario permet de réaliser presque le même rendement de 16,24 t/ha mais avec un apport important de 1095 mm. Le scénario n°13 consiste en l'application de trois irrigations en phase linéaire et deux en phase finale, alors que le scénario n° 19 consiste à réaliser 5 arrosages en phase linéaire et 3 en phase finale.

Dans la formation du rendement final en biomasse, si le suivi de la croissance en hauteur du maïs montre que la phase linéaire est déterminante, la phase finale joue

également un rôle non négligeable, comme le prouve la productivité journalière du maïs en 3^{ème} phase. L'efficacité de l'eau d'irrigation est influencée par la dose d'irrigation et le moment de son apport. On note une supériorité de l'EEI, si les irrigations sont appliquées en phase B que la phase C. A partir des résultats obtenus, on note une diminution continue de l'efficacité de l'eau à partir de la dose de 650 mm.

Les résultats donnés au tableau 12 montrent que les scénarios utilisant des doses d'irrigation les plus élevées (scénarios n° 14 à 19), bien qu'ils aient abouti aux meilleurs rendements en biomasse, sont toutefois moins efficaces quant à l'utilisation de l'eau d'irrigation et entraînent des pertes en eau non négligeables par drainage.

Dans l'objectif à la fois d'augmenter l'EEI et de minimiser les apports d'eau sans pour autant trop affecter la production, les stratégies d'irrigation basées sur les combinaisons des irrigations entre la phase 2 (B) et la phase 3 (C) selon les scénarios n°6 [2 en B et 1 en C], n°12 [2 en B et 2 en C] et le scénario n°13 [3 en B et 2 en C] permettent des meilleures valorisations de l'eau (fig. 3). Le dernier scénario, en comparaison aux deux premiers, permet une augmentation significative du rendement en biomasse (16,2 t/ha) mais, avec plus de pertes par drainage. Le scénario 6 permet certes d'avoir l'EEI la plus élevée (2,50 kg.m⁻³) mais le rendement en biomasse est de loin inférieur à celui du scénario n°13.

Si l'eau est disponible, la conduite de l'irrigation, selon le scénario n° 13, permet d'atteindre le double objectif de réaliser le rendement élevé et garantir une meilleure valorisation de l'eau. Si des restrictions de nombre d'irrigations doivent être appliquées, le recours aux scénarios n°12 et n° 6, dans cet ordre, permet de réaliser de bons rendements avec des EEI non négligeables. Ces deux derniers scénarios occasionnent des pertes par drainage les plus faibles. En raison de son taux de satisfaction hydrique, relativement inférieur (ETR/ETM = 73%, Tableau 12), le scénario 6 semble induire un stress hydrique pour la culture.

Le tableau 12 montre que les scénarios n° 13 (3 en B, 2 en C) et n° 12 (2 en B, 2 en C) qui ont permis d'optimiser le rendement en biomasse et l'EEI et ont réduit le drainage ont des taux de satisfaction en eau d'irrigation de 89 et 84% respectivement. Il va de soi donc que l'irrigation du maïs ensilage, selon le scénario n° 12, pourrait constituer une stratégie d'irrigation très intéressante.

En conclusion, pour les semis de mai étudié ici, il ressort que l'irrigation du maïs selon les combinaisons (3 en B, 2 en C) et (2 en B, 2 en C) en plus des deux irrigations au semis permettent de réduire substantiellement les doses d'irrigation et d'améliorer encore plus l'efficacité d'eau d'irrigation, sans pour autant trop affecter la productivité. La 2^{ème} stratégie réduit encore davantage les pertes en eau d'irrigation causées par le drainage.

Tableau 10: Dose moyenne d'irrigation utilisée pour le bersim par période (mm)

Mois	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.
Dose (mm)	91 ± 9,3	82 ± 11,2	86 ± 11,3	75 ± 9,8	69 ± 10,3	81 ± 8,3	76 ± 10,2	73 ± 10,6	112 ± 13,4

Bersim

Les pertes en eau par drainage sont d'autant plus importantes quand les doses d'irrigation sont élevées (Tableau 13). Les pertes par percolation, en hiver, sont très corrélées avec les pluies reçues ($R^2 = 0,95$). Le rapport drainage/irrigation varie entre 0,10 enregistré sous le scénario n° 12 qui applique cinq irrigations et 0,49 sous le scénario n°14, qui prévoit 13 arrosages.

Les résultats du tableau 13 montrent que le rendement maximal (15,0 t/ha) obtenu, sous le scénario n°14, correspond bien au potentiel de la variété 6454 en irrigué, qui est de l'ordre de 15 t/ha (Ameziane, 1995). Le rendement minimal était de 8,4 t/ha et a été obtenu avec un apport de 449 mm. Les résultats de simulation montrent également que les rendements dépendent en plus des quantités d'eau apportées des moments d'apports. A titre d'illustration, le scénario n°11 qui applique 409 mm permet d'obtenir un rendement de 10,8 t/ha, qui est plus élevé de 28% que celui obtenu avec 449 mm en appliquant le scénario n°10. Les cinq irrigations apportées, sous le scénario n° 11, ont été réparties sur le 1^{er} et le 2^{ème} cycle, alors que le même nombre d'irrigation a été appliqué uniquement au 1^{er} cycle sous le scénario n°10.

La répartition des irrigations, sur les différents cycles, permet d'améliorer le paramètre TSH qui traduit le taux de satisfactions des besoins hydriques. TSH varie entre 0,63 sous le scénario n°10 et 0,94 sous les scénarios appliquant des doses avoisinant 1000 mm. Cependant, pour ces derniers, bien que les rendements obtenus soient élevés, les pertes par drainage occasionnées sont également élevées et dépassent 40% des apports par irrigation. Quant à l'efficacité de la transpiration, elle varie entre 0,76 sous le scénario n°10 et 0,98 sous les scénarios 5, 7 et 14.

Les rendements annuels en biomasse sont significativement corrélés avec le taux de satisfaction hydrique (TSH) et l'efficacité de transpiration (ET) avec des valeurs de R^2 de 0,96 et 0,93 respectivement.

Pour analyser la réponse du bersim aux apports en eau en fonction de la saison, nous avons calculé les paramètres TSH et ET pour les trois saisons considérées (automne, hiver et printemps). En considérant les scénarios n°2, 3 et 4 qui ne diffèrent que par le nombre d'irrigations au printemps, on constate que deux irrigations apportées moyennant le scénario n°3 sont insuffisantes puisque la culture subit un stress avec des valeurs de 0,80 et 0,85 pour TSH et ET respectivement. En ajoutant deux irrigations au printemps, la culture s'est retrouvée non stressée avec des valeurs de 0,95

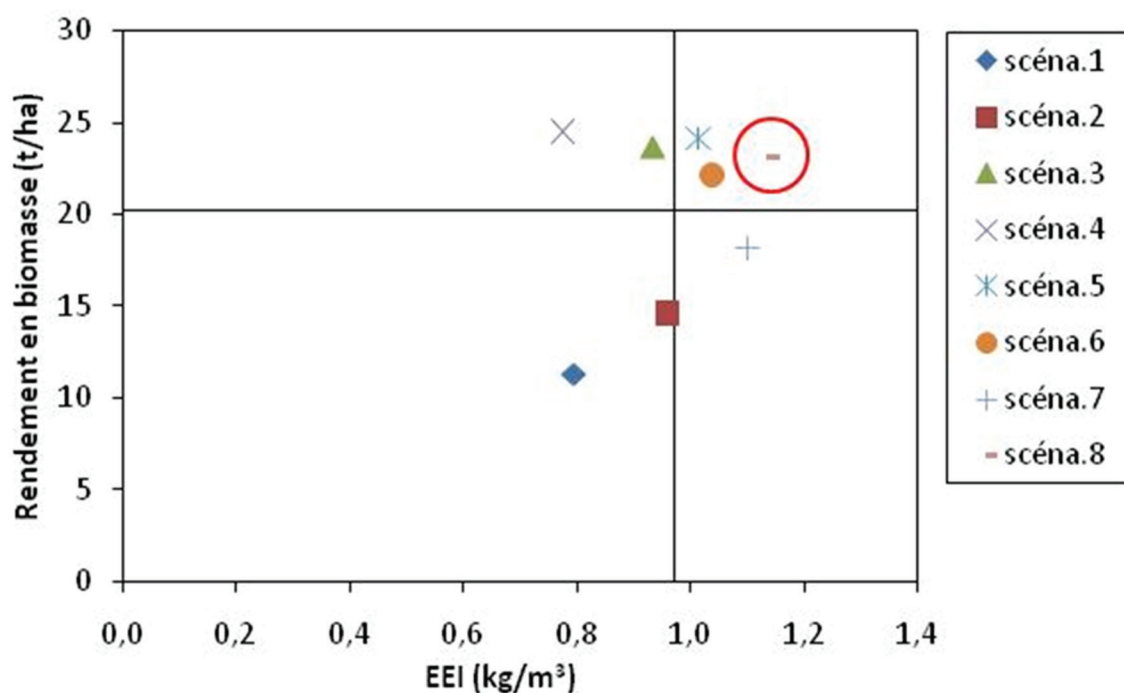


Figure 2: Efficacités de l'eau d'irrigation (EEI) et rendements en biomasse réalisés par différents scénarios virtuels sur la luzerne

Tableau 11: Résultats de simulation des scénarios virtuels sur la luzerne

N° scénario	Dose d'irrigation (mm)	Rendement t.MS/ha	EEI (kg/m³)	TSH	ET	Drainage (mm)
L1	804	11,31	0,78	0,72	0,90	120
L2	1009	14,61	0,97	0,77	0,92	208
L3	2010	23,73	0,91	0,90	0,97	991
L4	2528	24,52	0,75	0,92	0,98	1463
L5	1893	24,14	1,04	0,87	0,97	913
L6	1662	22,12	1,02	0,78	0,94	873
L7	1204	18,22	1,11	0,80	0,94	349
L8	1607	23,21	1,21	0,86	0,97	645

et 0,98 pour TSH et ET respectivement. L'ajout de deux autres irrigations (scénario n°4) n'a pas permis l'amélioration considérable du rendement (13,04 t/ha) et a occasionné au contraire des pertes supplémentaires par drainage.

La comparaison des deux scénarios n° 2 et n° 6 qui diffèrent par une irrigation supplémentaire en faveur de ce dernier en automne, a permis une augmentation de rendement de 1,4% due à une amélioration de TSH de 0,86 à 0,89. L'importance des apports d'hiver peut être évaluée en comparant les scénarios n°1 et 9 ou encore les scénarios n°5 et 6. Dans les premiers, l'application de deux irrigations en hiver, sous le scénario n°1, a permis d'augmenter le rendement de 37%. Les paramètres TSH et ET

se sont améliorés en hiver et au printemps. A l'exception des scénarios n° 10 et 11 où aucun apport n'a été effectué au printemps, la contribution des cycles de printemps au rendement total varie entre 40 et 47%.

L'analyse fréquentielle a montré que la distribution des rendements paraît normale et leur variabilité interannuelle est insignifiante au seuil 5%.

Les valeurs de l'EEI varient entre 0,70 kg/m³ obtenu sous le scénario n°14 qui applique 1186 mm d'eau répartie sur 13 irrigations et 1,24 kg/m³ comme maximum atteint en appliquant le scénario n° 1, qui prévoit l'application de 1, 2 et 2 irrigations en automne, hiver et printemps respectivement en plus des deux irrigations au semis avec une

Tableau 12: Résultats de simulation des scénarios virtuels sur maïs ensilage

N° scénario	Dose d'irrigation (mm)	Rendement t.MS/ha	EEI (kg/m ³)	ETR/ETM	Drainage (mm)
M1	402	9,81	2,41	0,57	42
M2	486	8,27	1,71	0,58	126
M3	376	5,77	1,52	0,39	100
M4	404	8,12	1,97	0,54	54
M5	427	6,34	1,46	0,65	0
M6	528	13,22	2,51	0,73	54
M7	539	12,63	2,34	0,73	61
M8	516	10,42	2,05	0,62	109
M9	662	12,81	1,92	0,77	126
M10	631	12,92	2,07	0,74	121
M11	638	13,73	2,16	0,78	132
M12	647	14,43	2,24	0,84	68
M13	758	16,15	2,13	0,89	149
M14	873	16,23	1,84	0,89	221
M15	764	15,29	1,96	0,84	147
M16	869	16,17	1,84	0,91	250
M17	976	16,19	1,67	0,92	355
M18	989	16,25	1,63	0,91	322
M19	1095	16,22	1,49	0,92	427

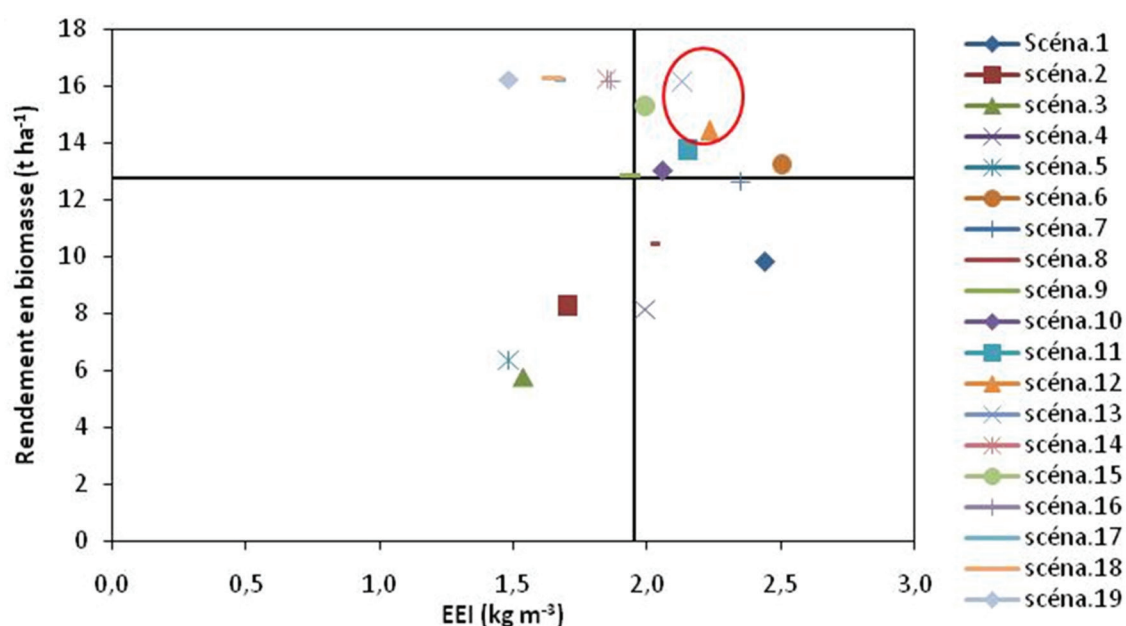


Figure 3: Efficacités de l'eau d'irrigation (EEI) et rendements en biomasse réalisés par différents scénarios virtuels sur le maïs

dose totale de 625 mm. Les valeurs données au tableau 13 montrent qu'à partir de cette dernière dose, l'EEI diminue en continu avec plus d'apport en eau.

L'établissement du graphe (Figure 4) du rendement total, en fonction de l'EEI, permet de différencier les scénarios étudiés. Ainsi, dans l'objectif de maximiser l'EEI et la production, l'adoption du scénario n°1 se distingue et permet de réaliser un rendement de 14,1 t/ha qui représente 94% du potentiel de la variété 6454 adoptée dans le cadre de cette étude. Ce scénario permet une meilleure EEI de 1,24 kg/m³ et occasionne de faibles pertes par drainage (environ 17% des apports en eau). Ce scénario applique une dose d'irrigation de 625 mm qui ne dépasse pas beaucoup les besoins en eau du bersim au Tadla estimés à 503 mm en moyenne (Bouazzama, 2013).

CONCLUSION

L'élaboration des scénarios d'irrigation des principales cultures fourragères est basée sur les règles de conduite de l'irrigation connues chez les agriculteurs, les résultats des essais sur l'irrigation des trois cultures, en relation avec les stades de croissance, ainsi que les attentes des services de distribution de l'eau au niveau du périmètre irrigué.

L'évaluation des scénarios virtuels élaborés montre que pour la luzerne, l'application d'une dose d'irrigation de 1600 mm selon un scénario qui prévoit l'application de 14 irrigations réparties en six arrosages durant le printemps, six en été, un en automne et un autre en début d'hiver permet de maximiser l'efficacité de l'eau d'irrigation (EEI) (1,21 kg/m³) et de réaliser un rendement de 23,1 t/ha, soit 95% du rendement potentiel.

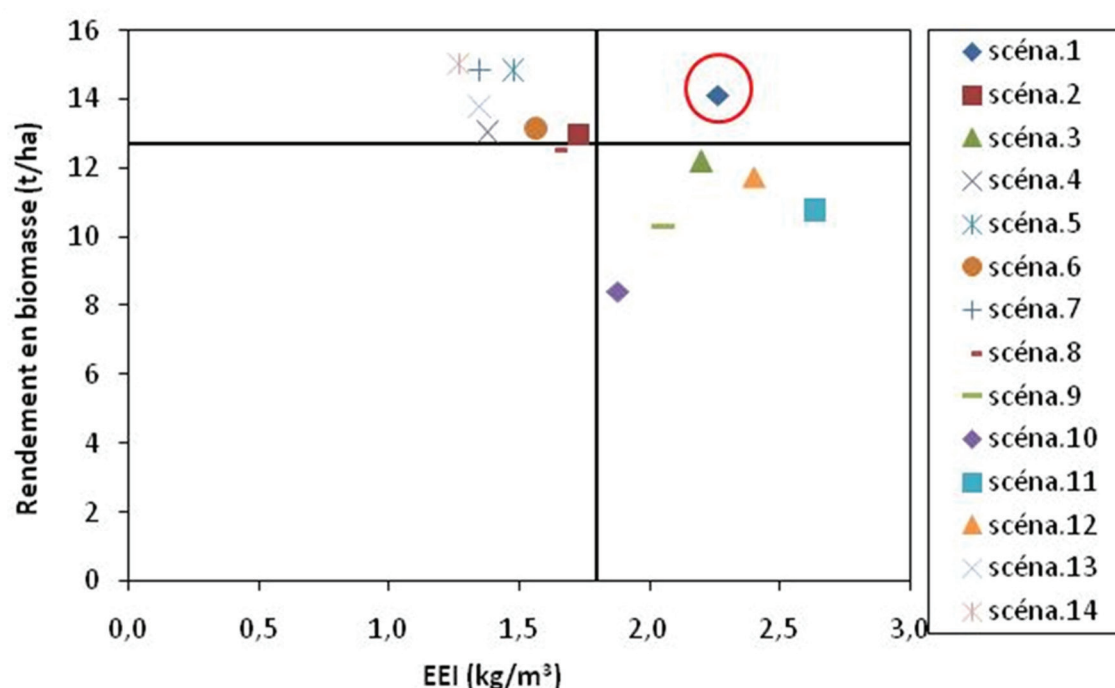


Figure 4: Efficacités de l'eau d'irrigation (EEI) et rendements en biomasse réalisés par différents scénarios virtuels sur le bersim

Tableau 13: Résultats de simulation des scénarios virtuels sur le bersim

N° scénario	Dose d'irrigation (mm)	Rendement t.MS/ha	EEI (kg/m ³)	TSH	ET	Drainage (mm)
B1	625	14,13	1,24	0,87	0,94	110
B2	750	12,96	0,88	0,85	0,91	233
B3	554	12,18	1,05	0,79	0,85	100
B4	946	13,04	0,71	0,87	0,91	409
B5	1003	14,82	0,84	0,94	0,99	420
B6	841	13,15	0,81	0,87	0,91	312
B7	1100	14,84	0,77	0,94	0,99	507
B8	762	12,52	0,81	0,83	0,86	263
B9	501	10,29	0,79	0,70	0,85	99
B10	449	8,43	0,46	0,63	0,76	159
B11	409	10,78	1,08	0,69	0,84	68
B12	489	11,75	1,10	0,75	0,85	47
B13	1024	13,79	0,73	0,89	0,95	451
B14	1186	15,03	0,70	0,94	1,00	576

Sur le maïs, l'application d'une dose de 648 mm selon la combinaison [2 en phase initiale (au semis), 2 en phase linéaire et 2 en étape finale] permet d'atteindre le double objectif de réaliser un rendement élevé et de garantir une meilleure valorisation de l'eau. Concernant le bersim, les résultats de simulation confirment que l'adoption du scénario qui prévoit l'application de 625 mm en 7 irrigations (3 en automne, 2 en hiver et 2 au printemps) permet de réaliser un rendement de 14,1 t/ha qui représente 94% du potentiel de la variété 6454. Ce scénario permet la meilleure efficacité de l'eau d'irrigation (1,24 kg/m³) et occasionne de faibles pertes par drainage estimées à environ 17% des apports en eau.

Le couplage des résultats de trois années d'expérimentations *in situ* (2008 à 2011) à ceux du calage, de la validation et des simulations de scénarios par le modèle CropSyst s'est révélé d'un grand intérêt pour l'amélioration de la conduite de l'irrigation des fourrages dans le périmètre irrigué de Tadla au Maroc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper n. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Ameziane T.E. (1995). Contribution à l'étude de la production du bersim irrigué dans le Gharb, mémoire de 3^{ème} cycle, IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- Bouazzama B., Xanthoulis D., Bouaziz A., Ruelle P., Mailhol J.C. (2012). Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in a semiarid climate of Tadla (Morocco). *Biot. Agri. Soci. Envir.* 16: 468-477.
- Bouazzama B., Xanthoulis D., Bouaziz A., Ruelle P., Mailhol J.C. (2012). Effet de l'irrigation déficitaire sur le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le maïs ensilage au périmètre irrigué de Tadla. Actes du colloque REZAS12 «Ressources en eau dans les zones arides et semis arides, enjeux et perspectives, cas du continent africain», Beni Mellal 14-16 novembre.
- Bouazzama B., Bouaziz A. (2012). Cultures fourragères dans la région de Tadla: Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau. *Agriculture du Maghreb* 60:92-95.
- Bouazzama B., Mailhol J. C., Xanthoulis D., Bouaziz A., Ruelle P., Belhouchette H. (2012). Silage maize growth simulation using PILOTE and CropSyst models. *Irrigation and Drainage*, 62: 84-96.
- Bouazzama B., T. Empain, Xanthoulis D., Bouaziz A. (2013). Evaluation of the model CropSyst in the simulation of alfalfa growth in Morocco. Proceeding of *International conference on sustainable water use for securing food production in the Mediterranean region under changing climate*. Agadir, Morocco, 10-15 March.
- Bouazzama B. (2013). Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les principales cultures fourragères au Tadla- Maroc. Thèse de doctorat. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique.
- Bouazzama B., Xanthoulis D., Bouaziz A., Mailhol J.C., Ruelle P. (2014). Application de la modélisation à la gestion de l'eau d'irrigation au périmètre irrigué de Tadla-Maroc. Proceeding du 1^{ère} colloque régional sur la gestion intégrée des ressources en eau dans la région de Tadla Azilal. Beni Mellal, 15 et 16 Mai.
- Bouazzama B., Bouaziz A., Xanthoulis D., Bahri A. (2015). Effet du déficit hydrique sur la croissance, le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez la luzerne (*Medicago sativa* L.) au Tadla. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 3: 16-26.
- Campbell GS. 1985. Soil physics with Basic. Elsevier, Amsterdam.
- Confalonieri, R., Bechini, L. (2004). A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *European Journal of Agronomy*, 21: 223-237.
- Jones C.A., Kiniry JR. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Monteith J.L. (1977). Climate and crop efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281: 277-329.
- Priestley CHB., Taylor RJ. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation large scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100.
- Ritchie JT, Godwin DC. & Otter-Nacke S. (1985). CERES-Wheat: A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Rizzo, V., Castrigrano, A., Di Bari, V., Romito, L. (1992). A new generalized concept of crop coefficient for the use in a crop at incomplete soil cover stage. In: Proceedings of the second ESA Congress, Warwick University, UK, July 25-29, pp. 200-201.
- Ross PJ. & Bristow KL. 1990. Simulating water movement in layered and gradational soils using the Kirchhoff transform. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54.
- Saeed I.A.M., El-Nadi A.H. (1997). Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. *Irrig Sci.*, 17: 63-68.
- Stockle CO, Martin S., Campbell G.S. (1994). CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46.
- Stöckle CO., Nelson RL. (2000). Cropsyst User's manual (Version 3.0). Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.
- Tanner CB., Sinclair TR. (1983). Efficient water use in crop production: research or research. In Limitations to Efficient Water Use in Crop Production (ed. H. Taylor), pp. 1-28. ASA-CSSA- SSSA, Madison, USA.